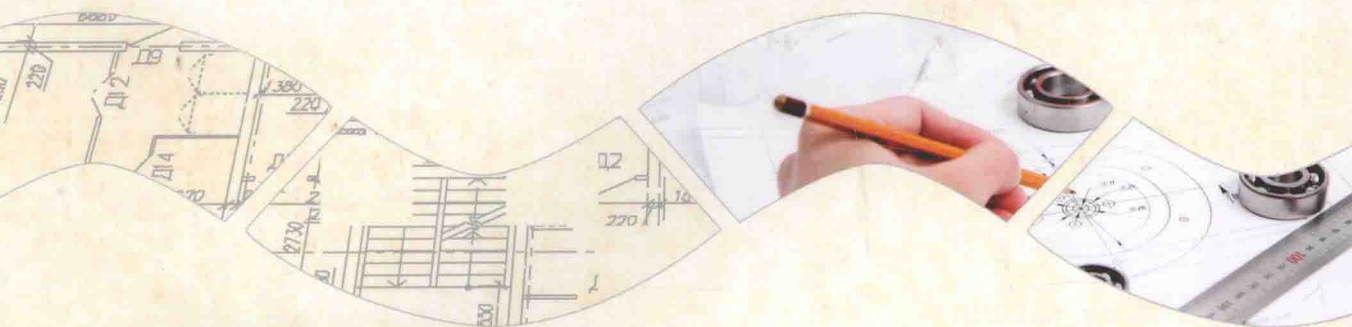


G O N G C H E N G C E L I A N G



工程测量

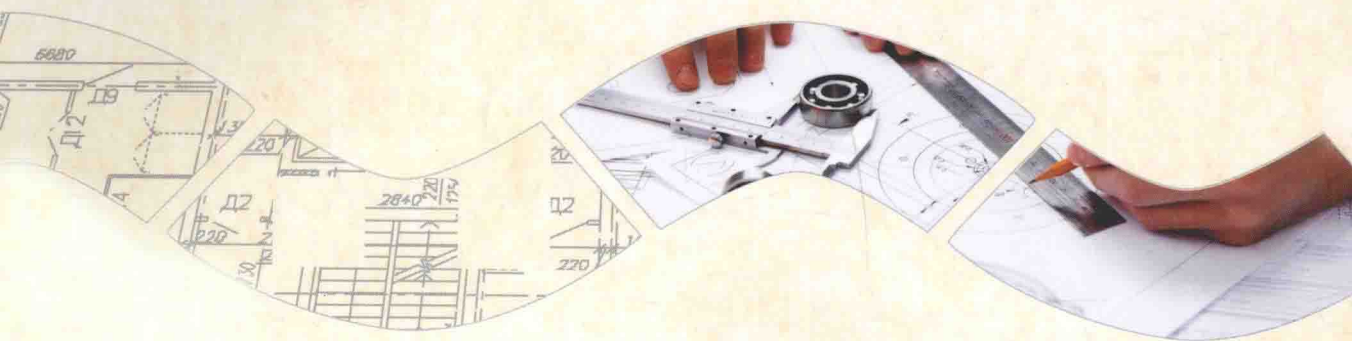
(第2版)

主 编 李长成 陈晓麟
主 审 许娅娅



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

策划编辑: 张 乔
责任编辑: 钟 博
封面设计: 妙思品位



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

通信地址: 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编: 100081

电 话: 010-82562903 68948351

网 址: www.bitpress.com.cn

ISBN 978-7-5682-0767-6



9 787568 207676 >

定价: 52.00 元

工 程 测 量

(第2版)

主 编 李长成 陈晓麟
副主编 李月姝 张立明
参 编 杨恩成 王宏伟 崔海英
王 枫 闫 洁 张树军
彭 龙 郑成艳
主 审 许娅娅

内 容 提 要

本书第2版是高等院校交通土建类规划教材。全书除绪论外共分十四章,主要内容包括测量学的基本知识;水准测量;角度测量;距离测量与直线定向;全站仪测量技术;GNSS测量简介;测量误差基本知识;控制测量;大比例尺地形图测绘及应用;道路中线测量;路线的纵、横断面测量;道路施工测量;桥涵测量;公路隧道施工测量等。

本书可作为高等院校测量专业的教材以及成人、自考、远程教育的教学用书,也可以作为建筑施工企业的工程技术人员的再教育、岗位培训的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

工程测量 / 李长成, 陈晓麟主编. —2版. —北京: 北京理工大学出版社, 2015.8
ISBN 978-7-5682-0767-6

I. ①工… II. ①李 ②陈… III. ①工程测量—高等学校—教材 IV. ①TB22

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第192638号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

82562903(教材售后服务热线)

68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京紫瑞利印刷有限公司

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 17.5

字 数 / 469千字

版 次 / 2015年8月第2版 2015年8月第1次印刷

定 价 / 52.00元

责任编辑 / 钟 博

文案编辑 / 钟 博

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

第1版前言

工程测量学是研究工程建设和自然资源开发中进行的控制测量、地形测绘、施工放样和变形监测的理论和技术的科学。道路工程测量是研究道路工程建设在道路规划、设计、施工、竣工、运营管理和后期养护等阶段所进行的各种测量工作的学科，在道路、桥梁和隧道工程建设中有着广泛的应用。

本教材主要介绍测量学在公路工程中的有关应用。在结合我国公路工程测量的生产实际的同时，也将现代测量领域的最新科技成果、技术方法反映出来；并注重实际，以培养学生分析问题、解决问题的能力。全体编写人员本着科学性、实用性、先进性的编写指导思想，根据测绘学科的发展状况，对本书的编写原则、选材的范围及其深度和广度、学时要求等问题，进行了探讨；在广泛调研和征求业内资深专家意见的基础上编写完成。教材内容侧重基本理论、基础知识和基本方法的阐述，力求做到简明扼要，深入浅出，贴近生产实际。教材每章后都附有思考题与习题，这样既便于教师组织教学，又便于学生自学。

本书由李长成、陈立春担任主编，赵金云、王坤、魏斌担任副主编。此外，参加本书编写的还有丛严明、宋永娟、车广侠、于慧玲、李月姝、朱春风、申建、刘仲波等。具体分工如下：李长成编写第一、八、九、十、十一章；陈立春编写第二、七、十四章；赵金云编写第三章；王坤编写第五章；魏斌编写第四章；车广侠编写第六章一、二、三、四节；宋永娟编写第六章五、六节；于慧玲编写第十三章一、二节和第六章第七节；李月姝编写第十三章第三、四节和绪论；朱春风编写第十三章五、六节；刘仲波编写第九章一、二节；申建编写第十二章一、二节；丛严明编写第十二章三、四节。全书由李长成统稿。

本书由长安大学公路学院道路勘测研究所的许娅娅教授担任主审。在此对参加审稿的专家和其他对本书的编写提出了宝贵意见和建议的专家，表示衷心的感谢！

本教材在编写过程中，参阅了大量的文献，引用了同类书刊的部分资料，在此，谨向有关作者表示衷心的感谢！

由于作者水平有限，本书在编写过程中，编者虽做了很大努力，但书中仍难免有疏漏及不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

第2版前言

本书按高等院校交通土建类各专业测量学课程的教学基本要求进行编写。本书编写前,根据高等院校教学的要求,以培养高等技术应用型专门人才为根本任务,以培养技术应用能力为主线,根据测绘学科的发展状况,编者们对本书的编写原则、选材范围及其深度和广度、学时要求等问题进行了深入地探讨,并在广泛调研和征求业内资深专家意见的基础上,全体编写人员本着科学性、实用性、先进性的编写指导思想,侧重于基本理论、基础知识和基本方法的阐述。

本书编写时力求做到内容简明扼要,深入浅出,贴近生产实际,在结合我国公路工程测量的生产实际的同时,也力求将现代测量领域的最新科技成果、技术方法反映出来,并注重实际,以培养学生分析问题、解决问题的能力,力争编写出一本内容先进、符合高等职业技术教育改革潮流的新一轮专业基础课教材。本书每章后都附有复习思考题,这样既便于教师组织教学又便于学生自学。

本书由李长成、陈晓麟担任主编,李月姝、张立明担任副主编,杨恩成、王宏伟、崔海英、王枫、张树军、彭龙、闫洁、郑成艳参加了本书部分内容的编写工作。具体编写分工如下:第一、八、九、十、十一章由李长成编写;第二、三、四章由陈晓麟编写;第七、十四章由李月姝编写;第五章由张立明编写;第六章第一、二、三、四节由杨恩成编写;第六章第五、六节由王宏伟编写;第十三章第一、二节和第六章第七节由崔海英编写;第十三章第三、四节和绪论由王枫编写;第十三章第五、六节由张树军编写;第十二章第一、二节由彭龙编写;第十二章第三、四节由闫洁和郑成艳编写。全书由李长成统稿。

本书由长安大学公路学院道路勘测研究所的许娅娅教授担任主审。在此编者对参加审稿的专家和其他对本书的编写提出了宝贵意见和建议的专家,表示衷心的感谢!

本书在编写过程中,参阅了大量的文献,引用了同类书刊的部分资料,在此,谨向有关作者表示衷心的感谢!北京理工大学出版社为本书的出版做了大量工作,在此也深表谢意!

由于作者水平有限,本书在编写过程中,编者虽做了很大努力,但书中仍难免会有错漏及不妥之处,诚请广大读者批评指正。

编 者

目 录

绪 论	1	第四章 距离测量与直线定向	55
第一章 测量学的基本知识	3	第一节 卷尺量距	55
第一节 地球的形状和大小	3	第二节 视距测量	60
第二节 地面点位的表示方法	4	第三节 直线定向	62
第三节 用水平面代替基准面的限度	7	第四节 罗盘仪的构造与使用	64
第四节 测图原理与测量工作概述	9	复习思考题	65
复习思考题	11	第五章 全站仪测量技术	66
第二章 水准测量	12	第一节 概述	66
第一节 概述	12	第二节 全站仪测量原理	67
第二节 水准测量的原理	13	第三节 全站仪的基本构造和使用方法	71
第三节 水准测量的仪器和工具	14	第四节 全站仪的模块测量方法	80
第四节 水准测量的实施	18	复习思考题	82
第五节 微倾式水准仪的检验与校正	24	第六章 GNSS测量简介	83
第六节 自动安平水准仪简介	27	第一节 概述	83
第七节 电子水准仪及其使用	29	第二节 GPS系统的组成	85
第八节 水准测量的误差及注意事项	32	第三节 GPS轨道的大地参考坐标系	89
复习思考题	34	第四节 GPS定位的原理及主要特点	90
第三章 角度测量	36	第五节 GPS-RTK测量	93
第一节 水平角和竖直角	36	第六节 GPS测量的作业模式	96
第二节 光学经纬仪的构造及使用	37	复习思考题	98
第三节 水平角观测	42	第七章 测量误差基本知识	99
第四节 竖直角观测	45	第一节 测量误差的概念	99
第五节 光学经纬仪的检验与校正	48	第二节 偶然误差的特性	100
第六节 角度观测的误差及注意事项	51	第三节 观测值的算术平均值及改正值	102
复习思考题	53	第四节 评定观测值精度的标准	103

第五节 误差传播定律及应用.....	105	第十一章 路线的纵、横断面测量.....	213
复习思考题.....	108	第一节 基平测量.....	213
第八章 控制测量.....	110	第二节 用水准仪进行中平测量.....	214
第一节 控制测量的分类.....	110	第三节 用全站仪进行中平测量.....	217
第二节 地面点之间的平面位置关系.....	113	第四节 路线的纵断面图.....	217
第三节 导线测量.....	116	第五节 横断面测量.....	219
第四节 GPS测量.....	124	第六节 横断面图的绘制.....	222
第五节 交会法定点.....	128	复习思考题.....	223
第六节 高程控制测量.....	131	第十二章 道路施工测量.....	224
复习思考题.....	140	第一节 概述.....	224
第九章 大比例尺地形图测绘及应用... 142		第二节 施工测量的基本工作.....	225
第一节 地形图的基本知识.....	142	第三节 点的平面位置的测设.....	229
第二节 地物和地貌在图上的表示方法.....	147	第四节 公路路线施工测量.....	230
第三节 测图前的准备工作.....	153	复习思考题.....	236
第四节 大比例尺地形图测绘.....	154	第十三章 桥涵测量.....	237
第五节 地形图的检查、拼接与整饰.....	158	第一节 概述.....	237
第六节 地形图的应用.....	159	第二节 涵洞施工测量.....	238
复习思考题.....	164	第三节 桥梁控制网的形式.....	239
第十章 道路中线测量.....	165	第四节 桥梁轴线和墩台中心定位测量.....	247
第一节 勘测设计阶段的定线测量.....	165	第五节 桥梁细部放样.....	254
第二节 路线转角的测定.....	168	第六节 桥涵附属工程放样测量.....	255
第三节 里程桩的设置.....	171	复习思考题.....	256
第四节 圆曲线的测设.....	173	第十四章 公路隧道施工测量.....	257
第五节 虚交.....	177	第一节 概述.....	257
第六节 缓和曲线的测设.....	180	第二节 地面控制测量.....	258
第七节 复曲线的测设.....	186	第三节 洞内施工测量.....	265
第八节 回头曲线的测设.....	189	第四节 竖井联系测量.....	269
第九节 几种典型曲线的计算示例.....	190	第五节 贯通测量与贯通误差估计.....	272
第十节 道路中线逐桩坐标计算.....	207	复习思考题.....	273
第十一节 道路立交匝道测设简介.....	210	参考文献.....	274
复习思考题.....	212		

绪 论

一、测量学及其任务

测量学是研究如何确定地球表面上点的平面位置和高程；如何将地球表面的地貌、地物、行政和权属界线测绘成图；如何确定地球的形状和大小；以及将规划设计的点和线在实地上定位的科学。它的任务包括两部分，即测绘和测设。

测绘是指用测量仪器和工具，通过实地测量和计算得到一系列测量信息，通过把地球表面的地形绘成地形图或编织成数据资料，供经济建设、规划设计、科学研究和国防建设使用。

测设是指把图纸上规划设计好的建筑物、构造物的位置在地面上用特定的方式标定出来，作为施工的依据。测设又称为施工放样。

二、测量学的分类

测量学按研究范围和对象的不同，可划分为如下几个分支学科。

1. 大地测量学

大地测量学是研究和测定地球形状、大小和重力场、地球的整体与局部运动和地面点的几何位置以及它们变化的理论和技术的科学。大地测量又分为常规大地测量和卫星大地测量。

2. 摄影测量与遥感学(“3S”集成技术)

摄影测量与遥感学是研究利用电磁波传感器获取目标物的影像数据，从中提取语义和非语义的信息，并利用图形、图像和数字形式表达目标物空间分布及相互关系的科学。这一科学过去叫摄影测量学。摄影测量已经进入了“数字摄影测量”阶段，在摄影测量中不但引进了遥感技术(简称 RS)，而且与卫星定位技术(简称 GPS)和地理信息技术(简称 GIS)相集成，成为一种充分利用各自的技术特点，快速准确而又经济的为人们提供所需要的地球空间信息的科学与技术(简称“3S”集成技术)。

3. 地图制图学

地图制图学是研究将地球表面的点、线经过投影变换后绘制成满足各种不同要求的地图、海图的科学。

4. 海洋测量学

海洋测量学是以海水体和海底为测绘对象，研究测量及海图编制的理论和方法的科学。同陆地测绘相比，海洋测绘具有独自的特点，主要有：测量内容综合性强，要同时完成多种观测项目，需多种仪器配合施测；测区条件复杂，大多为动态作业；肉眼不能通视水域底部，精确测量难度较大等。因此，海洋测绘的基本理论、技术方法和测量仪器设备有许多不同于陆地测量之处。

5. 工程测量学

工程测量学是研究工程建设和自然资源开发中进行的控制测量、地形测绘、施工放样和变形监测的理论和技术的科学。根据研究和工作的对象不同，可分为公路工程测量、铁路工程测量、建筑工程测量、矿山测量、水利工程测量等。是测量学在国民经济和国防建设中的直接应用。

道路工程测量是研究道路工程建设在道路规划、设计、施工、竣工、运营管理和后期养护等阶段所进行的各种测量工作的学科，是在数学、物理等学科的基础上应用各种测量技术解决道路工程建设中实际测量问题的学科，是一门应用科学。

本教材主要介绍测量学在公路工程中的有关应用。

三、工程测量在公路建设中的应用

测量工作对于国家的经济建设和国防建设具有非常重要的作用，在道路、桥梁和隧道工程建设中有着广泛的应用。要建设一条能体现安全、迅速、经济、美观的公路，必须在调查研究、实地测量、掌握大量基础资料的前提下，设计出具有一定技术标准、满足交通运输要求、经济合理的方案，然后经过现场施工而完成。其中实地测量获取资料、施工测量保证设计方案的准确实施是至关重要的。

在公路建设中，为了选择一条安全、迅速、经济、美观、合理的公路路线，首先要进行勘测，即在沿着路线可能经过的范围内布设控制点，进行控制测量，测绘路线带状地形图、纵断面图，收集沿线地质、水文、资源等资料，作为纸上定线、编制比较方案和初步设计的依据。根据测量得到的数据资料进行路线选线。确定路线方案后，还要进行路线的详细测设，也就是进行路线的中线测量、纵断面测量、横断面测量和有关调查测量等，以便为路线设计提供准确、详细的外业资料。当路线跨越河流时，拟设置桥梁之前，应测绘河流两岸的地形图，测定桥轴线的长度及桥位处的河床断面，为桥梁方案选择及结构设计提供必要的的数据。当路线采用隧道形式穿越高山时，应测定隧道的轴线、洞口、竖井等位置，为隧道设计提供必要的的数据。

公路经过技术设计后，其平面线形、纵坡、横断面及其他内容等，便有了设计图和数据，据此即可进行公路施工。施工前，需要恢复中线，公路中线测定后，一般情况要经过一段时间才能施工，在这段时间内，部分标志桩被破坏或损失，因此施工前必须进行一次复测工作，以恢复公路中线的位置。需要将已设计好的路线、桥涵和隧道等构造物的图纸中的各项元素，按规定的精度准确无误地测设于实地，即施工前必须进行的施工放样测量。施工过程中，要经常通过各种测量来检查工程的进度和质量。在隧道施工过程中还要不断地进行贯通测量，以保证隧道的平面位置和高程正确贯通。道路、桥梁、隧道工程结束后，还要用测量来检查竣工情况，即进行竣工验收，并通过必要的测量来编制竣工图，以满足工程的验收、维护、加固以及扩建的需要。

在投入使用后的营运阶段，还要用测量进行一些常规检查和定期进行变形观测，进行必要的养护和维修，以确保道路、桥梁、隧道等构造物的安全使用。

可以说，道路、桥梁、隧道的勘测、设计、施工、竣工及养护的各个阶段都离不开测量技术。因此，作为一名从事道桥建设的技术人员，必须具备测量学的基本理论、基本知识和基本技能，才能为我国的交通事业多做贡献。

第一章 测量学的基本知识

第一节 地球的形状和大小

测量工作是在地球的自然表面上进行的,而地球自然表面有高山、丘陵、平原和海洋等,其形态高低不平,很不规则。为了确定地面点的位置和绘制地形图,就有必要把直接观测的数据结果归化到一个参考面上,而这个参考面必须与地球形体的表面相吻合,因此我们有必要认识地球的形体和与测量有关的坐标系问题。

一、大地水准面

尽管地球的表面高低不平,很不规则,甚至高低相差很大,如最高的珠穆朗玛峰高出海平面达 8 844.43 m(2005 年 10 月 9 日国家测绘局公布数据),最低的太平洋西部的马里亚纳海沟低于海平面达 10 923 m(2012 年 7 月我国蛟龙号对马里亚纳海沟南端的“挑战者深渊”进行了高精度多波束测量所得数据)。但是这样的高低起伏,相对于半径近似为 6 371 km 的地球来说还是很小的。又由于海洋面积约占整个地球表面的 71%,陆地面积只占 29%,因此,可以把海水面延伸至陆地所包围的地球形体看作地球的形状。设想有一个静止的海水面,向陆地延伸而形成一个闭合曲面,这个曲面称为水准面。水准面作为流体的水面是受地球重力影响而形成的重力等势面,是一个处处与重力方向垂直的连续曲面。由于海水有潮汐,海水面时高时低,因此,水准面有无数多个,将其中一个与平均海水面相吻合的水准面,称为大地水准面,如图 1-1(a)所示。大地水准面是测量工作的基准面,由大地水准面所包围的地球形体,称为大地体。

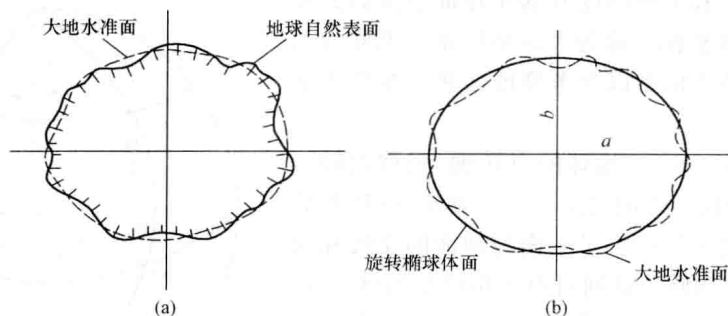


图 1-1 地球的自然表面、大地水准面和旋转椭球面

另外,将重力的方向线称为铅垂线,铅垂线是测量工作的基准线。

由于海水面是个动态的曲面,平均静止的海水面是不存在的。为此,我国在青岛设立验潮站,长期观察和记录黄海海水面的高低变化,取其平均值作为我国的大地水准面的位置(其高程为零),并在青岛建立了水准原点。

二、旋转椭球体

用大地体表示地球的形状是比较恰当的,但是由于地球内部质量分布不均匀,引起局部重力异常,导致铅垂线的方向产生不规则的变化,使得大地水准面上也有微小的起伏,成为一个复杂的曲面,如图 1-1(b)所示。因此无法在这复杂的曲面上进行测量数据的处理。为了测量计算工作的方便,通常用一个非常接近于大地水准面,并可用数学式表示的几何形体来代替地球的形状作为测量计算工作的基准面。这一几何形体称为地球椭球。它是由一个椭圆绕其短轴旋转而成的,故又称为旋转椭球,如图 1-1(b)所示。这样,测量工作的基准面为大地水准面,而测量计算工作的基准面为旋转椭球面。

长半轴: $a=6\,378.140\text{ km}$

短半轴: $b=6\,356.755\text{ km}$

$$\text{扁率: } \alpha = \frac{a-b}{a} \approx \frac{1}{298.257}$$

由于旋转椭球的扁率很小,因此当测区范围不大时,可近似地把旋转椭球视为圆球,其半径近似值为: $R = \frac{1}{3}(2a+b) \approx 6\,371\text{ km}$ 。

第二节 地面点位的表示方法

测量工作的基本任务是确定地面点的空间位置。在一般工程测量中,确定地面点的空间位置通常需用三个量,即该点在一定坐标系下的三维坐标,或该点的二维球面坐标或投影到平面上的二维平面坐标,以及该点到大地水准面的铅垂距离(高程)。

一、确定地面点位的坐标系

1. 大地坐标系

用大地经度 L 和大地纬度 B 表示地面点投影到旋转椭球面上位置的坐标,称为大地坐标系,也称为大地地理坐标系。该坐标系以参考椭球面和法线作为基准面和基准线。

如图 1-2 所示, NS 为地球的自转轴(或称地轴), N 为北极, S 为南极。过地面任一点与地轴 NS 所组成的平面称为该点的子午面。子午面与球面的交线称为子午线或称经线。国际公认通过英国格林尼治(Greenwich)天文台的子午面,是计算经度的起算面,称为首子午面。过 F 点的子午面 $NFKSON$ 与首子午面 $NGMSON$ 所组成的两面角,称为 F 点的大地经度。大地经度自首子午线向东或向西由 0° 起算至 180° 在首子午线以东者称为东经,可写成 $0^\circ \sim 180^\circ\text{E}$,以西者为西经,可写成 $0^\circ \sim 180^\circ\text{W}$ 。

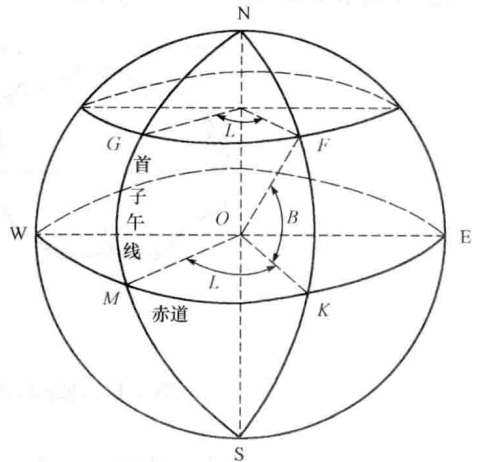


图 1-2 大地坐标系

垂直于地轴 NS 的平面与地球球面的交线称为纬线;通过球心 O 并垂直于地轴 NS 的平面,称为赤道平面。赤道平面与球面相交的纬线称为赤道。过 F 点的法线(与旋转椭球垂直的线)与

赤道平面的夹角,称为 F 点的大地纬度。在赤道以北者为北纬,可写成 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$,在赤道南者为南纬,可写成 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{S}$ 。

例如,我国首都北京位于北纬 40° 、东经 116° ,也可以写成 $B=40^{\circ}\text{N}$ 、 $L=116^{\circ}\text{E}$ 表示。

用大地坐标表示的地面点,统称为大地点。一般而言,大地坐标是由大地经度 L 、大地纬度 B 和大地高 H 三个量组成,用以表示地面点的空间位置。

新中国成立初期,我国采用大地坐标系为“1954 年北京坐标系”,亦称“北京—54 坐标系”(简称 P_{54})。该坐标系采用了苏联的克拉索夫斯基椭球体,其参数是:长半轴 $a=6\,378.245\text{ km}$;扁率 $\alpha=1/298.3$;坐标原点位于苏联的普尔科沃。

我国目前采用的大地坐标为“1980 年国家大地坐标系”,亦称“西安—80 坐标系”(简称 C_{80}),是根据椭球定位的基本原理和我国的实际地理位置建立的。大地原点设在我国中西部的陕西省泾阳县永乐镇。椭球参数采用 1975 年国际大地测量与地球物理联合会推荐值:椭球长半轴 $a=6\,378.140\text{ km}$;扁率 $\alpha=1/298.257$ 。

2. 地心坐标系

地心坐标系属于空间三维直角坐标系,主要用于卫星大地测量。由于人造地球卫星围绕地球运动,地心坐标系取地球质心为坐标原点 O , x 、 y 轴在地球赤道平面内,首子午面与赤道平面的交线为 x 轴、 z 轴与地球自转轴相重合,如图 1-3 所示。地面点 A 的空间位置用三维直角坐标 x_A 、 y_A 和 z_A 表示。地心坐标和大地坐标可以通过一定的数学公式进行换算。

3. 高斯平面直角坐标系

在工程测量中,常将椭球坐标系按一定的数学法则投影到平面上成为平面直角坐标系,为满足工程测量及其他工程的应用,我国采用高斯(Gauss)投影。

高斯投影法是将地球划分成若干带,然后将每带投影到平面上。如图 1-4 所示,投影带是从首子午线起,每隔经差 6° 划一带(称为 6° 带),自西向东将整个地球划分成经差相等的 60 个带,各带从首子午线起,自西向东依次编号用数字 1, 2, 3, ..., 60 表示。位于各带中央的子午线称为该带的中央子午线。

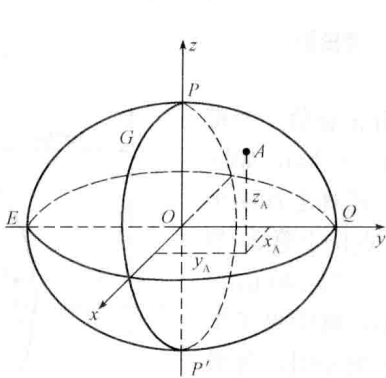


图 1-3 地心坐标系

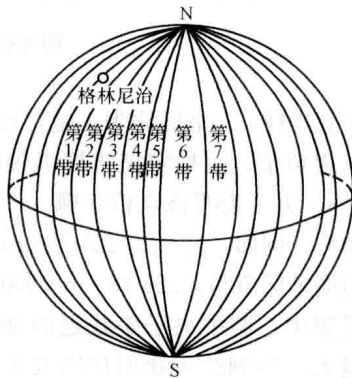


图 1-4 高斯投影分带

第一个 6° 带的中央子午线的精度为 3° ,任意带的中央子午线精度 L_0 可按下式计算:

$$L_0=6N-3 \tag{1-1}$$

式中 N ——投影带的带号。

按上述方法划分投影带后,即可进行高斯投影。如图 1-5(a)所示,设想用一个平面卷成一个空心椭圆柱,把它横着套在旋转椭球外面,使椭圆柱的中心轴线位于赤道面内并通过球心,且使旋转椭球上某 6° 带的中央子午线与椭圆柱面相切。在椭球面上的图形与椭球柱面上的图形

保持等角的情况下，将整个 6° 带投影到椭球柱面上。然后，将椭球柱沿着通过南北极的母线切开并展成平面，便得到 6° 带在平面上的影像，如图 1-5(b) 所示。中央子午线经投影展开后是一条直线，以此直线作为纵轴，向北为正，即 x 轴；赤道是一条与中央子午线相垂直的直线，将它作为横轴，向东为正，即 y 轴；两直线的交点作为原点，则组成了高斯平面直角坐标系。

将投影后具有高斯平面直角坐标系的 6° 带一个个拼接起来，便得到图 1-6 所示的图形。

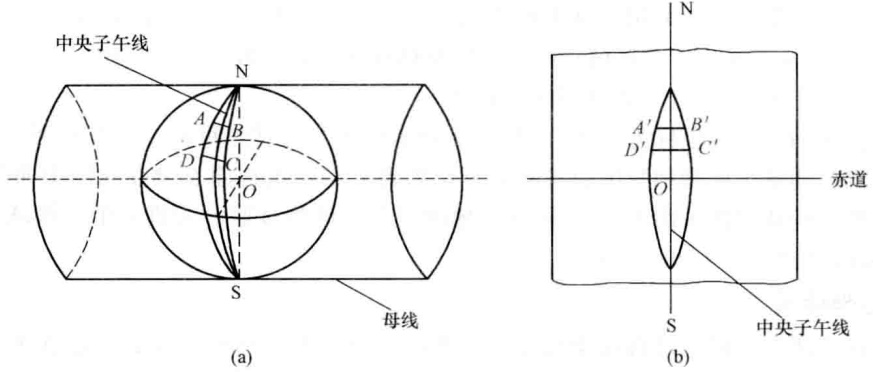


图 1-5 高斯投影

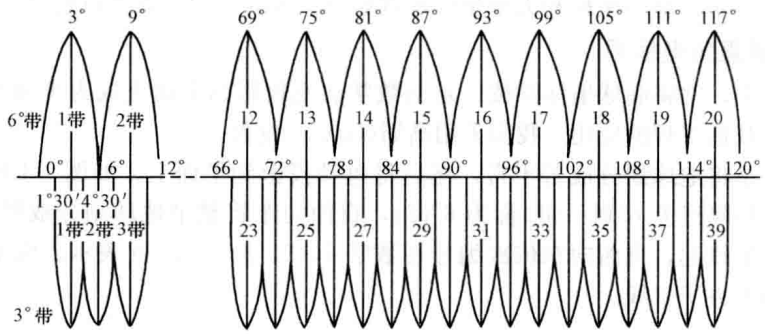


图 1-6 6° 带和 3° 带投影

我国位于北半球， x 坐标均为正值，而 y 坐标有正有负。为避免横坐标 y 出现负值，故规定把坐标纵轴向西平移 500 km，如图 1-7 所示。另外，为了表明该点位于哪一个 6° 带内，还规定在横坐标值前冠以带号，例如： $y_A = 20\ 225\ 760\text{ m}$ ，表示 A 点位于第 20 带内，其真正的横坐标值为： $225\ 760\text{ m} - 500\ 000\text{ m} = -274\ 240\text{ m}$ 。

在高斯投影中，离中央子午线近的部分变形小，离中央子午线越远变形越大。当测绘大比例尺图要求投影变形更小时，可采用三度分带投影法。它是从东经 $1^\circ 30'$ 起，自西向东每隔经差 3° 划分一带，将整个地球划分为 120 个带，每带中央子午线的经度 L'_0 可按下式计算：

$$L'_0 = 3 \times n \quad (1-2)$$

式中 n —— 3° 带的带号。

4. 独立平面直角坐标系

大地水准面虽然是曲面，但当测量区域较小(如半径不大于 10 km 的范围)时，可以用测区中心点 A 的切平面来代替曲面，如图 1-8 所示。地面点在切平面上的投影位置就可以用平面直

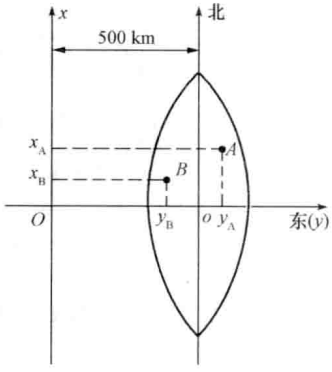


图 1-7 高斯平面直角坐标

角坐标系来确定。测量工作中采用的平面直角坐标系如图 1-9 所示，以两条互相垂直的直线为坐标轴，两轴的垂点为坐标原点，规定南北方向为纵轴，并记为 x 轴， x 轴向北为正，向南为负；以东西为横轴，并记为 y 轴， y 轴向东为正，向西为负。地面上某点 P 的位置可以用 x_p 和 y_p 表示。平面直角坐标系中象限按顺时针方向编号。

x 轴与 y 轴和数学上规定的互换，其目的是使定向方便(测量上以北方向为角度一坐标方位角起始方向)，且将数学上的公式直接照搬到测量的计算工作中，不需要任何变更。原点 O 一般选在测区的西南角，如图 1-8 所示，使测区内各点的坐标均为正值。

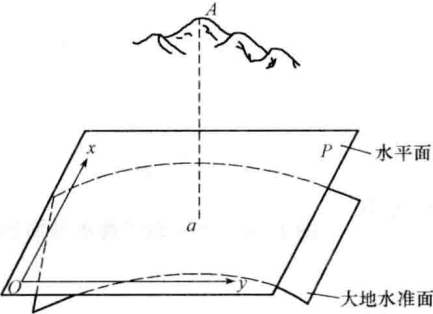


图 1-8 以切平面代替曲面

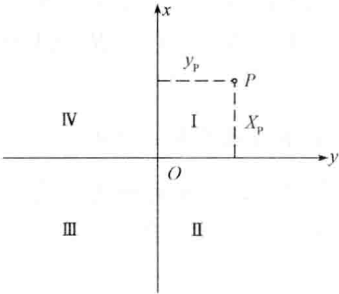


图 1-9 独立平面直角坐标系

二、地面点的高程

地面点到大地水准面的铅垂距离，称为该点的绝对高程或称海拔，通常以 H_i 表示。如图 1-10 所示， H_A 和 H_B 即为 A 点和 B 点的绝对高程。

当个别地区引用绝对高程有困难时，可采用假定高程系统，即采用任意假定的水准面作为高程起算的基准面。如图 1-10 中所示，地面点到假定水准面的铅垂距离，称为假定高程，如图 H'_A 和 H'_B 。

地面上两个点之间的高程差称为高差，通常用 h_{ij} 表示。如图 1-10 所示，地面上点 A 与点 B 之间的高差为：

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \tag{1-3}$$

由此可见，两点间的高差与高程起算面无关。

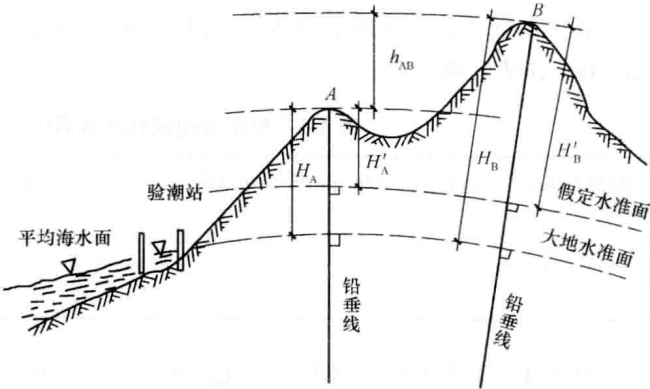


图 1-10 高程和高差

第三节 用水平面代替基准面的限度

由前文可知，测量工作的基准面是大地水准面，大地水准面是一个曲面。从理论上讲，将极小部分的水准面当作平面也是要产生变形的，但是由于测量和绘图也都含有不可避免的误差，因此如果将某一测区范围内的水准面当作平面看待，其产生的误差不超过测量和绘图的误差，那么这样做是可以的，而且也是合理的。下面来讨论以水平面代替水准面时对距离和高程的影响，以便限制水平面作为基准面的范围。

一、水平面代替水准面对距离的影响

如图 1-11 所示, A、B、C 是地面点, 它们在大地上水准面上的投影点是 a 、 b 、 c , 用该区域中心点的切平面代替大地水准面后, 地面点在水平面上的投影点是 a' 、 b' 、 c' , 现分析由此而产生的影响。设 A、B 两点水准面上的距离为 D , 在水平面上的距离为 D' , 则两者之差为 ΔD , 即用水平面代替水准面所引起的距离差异。在推导公式时, 近似地将大地水准面视为半径为 R 的球面, 则有:

$$\Delta D = D' - D = R(\tan\theta - \theta) \quad (1-4)$$

将 $\tan\theta$ 展开成级数: $\tan\theta = \theta + \frac{1}{3}\theta^3 + \frac{1}{5}\theta^5 + \dots$

因 θ 角很小, 因此可略去三次以上的高次项, 只取其前两项代入式(1-4)中, 得:

$$\Delta D = R(\theta + \frac{1}{3}\theta^3 - \theta)$$

又因 $\theta = D/R$, 故:

$$\Delta D = \frac{D^3}{3R^2} \quad (1-5)$$

或

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{D^2}{3R^2} \quad (1-6)$$

在上两式中, 取地球半径 $R = 6\,371\text{ km}$, 当距离 D 取不同的值时, 则得到不同的 ΔD 和 $\Delta D/D$, 其结果列入表 1-1 中。

表 1-1 用水平面代替水准面的距离误差和相对误差

距离 D/km	距离误差 $\Delta D/\text{cm}$	相对误差 $\Delta D/D$	距离 D/km	距离误差 $\Delta D/\text{cm}$	相对误差 $\Delta D/D$
10	0.8	1 : 1 250 000	50	102.6	1 : 49 000
25	12.8	1 : 200 000	100	821.2	1 : 12 000

从表 1-1 可以看出, 当 $D = 10\text{ km}$ 时, 所产生的相对误差为 1 : 1 250 000, 这样小的误差, 对精密量距来说是允许的。因此, 在以 10 km 为半径的圆面积之内进行距离测量时, 可以把水准面当作水平面看待, 即可不考虑地球曲率对距离的影响。

二、水平面代替水准面对高程的影响

在图 1-11 中, 地面上点 B 的高程应是铅垂距离 bB , 如果用水平面作基准面, 则 B 点的高程为 $b'B$, 两者之差为 Δh , 即为对高程的影响。从图中可得:

$$\Delta h = bB - b'B = Ob' - Ob = R\sec\theta - R = R(\sec\theta - 1) \quad (1-7)$$

将 $\sec\theta$ 展开成级数: $\sec\theta = 1 + \frac{1}{2}\theta^2 + \frac{5}{24}\theta^4 + \dots$; 因 θ 角很小, 因此只取其前两项代入式(1-7), 又因 $\theta = D/R$, 则得:

$$\Delta h = R(1 + \frac{1}{2}\theta^2 - 1) = \frac{1}{2}\theta^2 = \frac{D^2}{2R} \quad (1-8)$$

取 $R = 6\,371\text{ km}$, 用不同的距离 D 代入式(1-8), 便得到表 1-2 所列的结果。

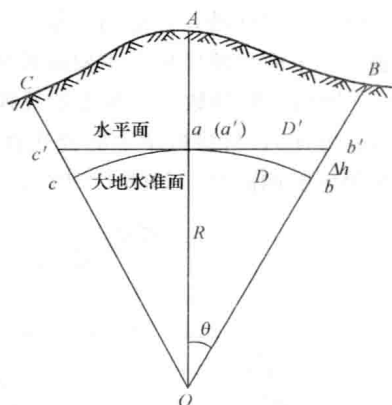


图 1-11 水平面代替水准面的影响

表 1-2 用水平面代替水准面的高差误差

D/km	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	2.0	5.0	10
$\Delta h/\text{cm}$	0.08	0.31	0.71	1.26	1.96	7.85	31.39	196.20	784.81

从表 1-2 可以看出，用水平面作基准面对高程的影响是很大的。例如：距离为 200 m 时就有 0.31 cm 的高程误差，在 500 m 时高程误差达 1.96 cm，这在测量中是不被允许的。因此，就高程测量而言，即使距离很短，也应用水准面作为测量的基准面，即应考虑地球曲率对高程的影响。

第四节 测图原理与测量工作概述

地球表面的各种形态(或简称为地形)，可分为地物和地貌两大类。地面上所有人工或自然形成的固定性物体称为地物，如河流、湖泊、道路和房屋等；地面上高低起伏的形态称为地貌，如山岭、谷地和陡崖等。下面以地物和地貌测绘到图纸上为例，介绍测量工作的程序和原则。

图 1-12(a)所示为一幢房屋。其平面位置由房屋轮廓线的一些折线组成，如能确定图 1-12(a)各点的平面位置，则这幢房屋的位置就确定了。图 1-12(b)所示是一条河流，它的岸边线虽然很不规则，但弯曲部分可看出是由折线所组成，只要确定 9~16 各点的平面位置，这条河流的位置也就确定了。至于地貌，其地势起伏虽然复杂，但仍可以看成是由许多不同方向、不同坡度的平面相交的几何体。相邻平面的交线就是方向变化线和坡度变化线。只要确定出这些方向变化线与坡度变化线转折点的平面位置和高程，地貌的形状和大小基本情况也就反映出来。因此，不论地形还是地貌，它们的形状和大小都是由一些特征点的位置所决定的，这些特征点也称碎部点。

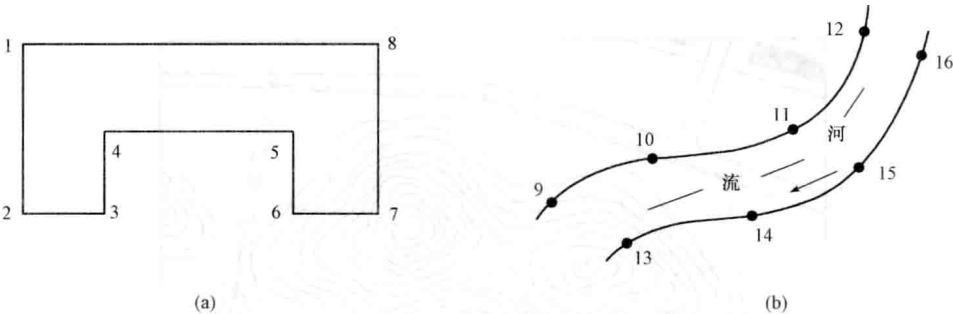


图 1-12 地物的轮廓线及碎部点

测量时，主要就是测定这些碎部点的平面位置和高程。测定碎部点位置的程序通常分为两步：

第一步为控制测量。如图 1-13 所示，先在测区内选择若干具有控制意义的点 A, B, C, …，作为控制点。以精密的仪器和准确的方法测定各控制点之间的距离 D ，各控制边之间的水平夹角 β ，如果某一条边(如图 1-13 中的 AB 边)的方位角 α 和其中某一点(例如 A 点)的坐标已知，则可求出其他控制点的高程。

第二步为碎部测量。即根据控制点测定碎部点的位置，例如在控制点 A 上测定其周围碎部点 M, N, …的平面位置和高程。这种“从整体到局部”“先控制后碎部”的方法是组织测量工作应遵循的原则，其优点是可以减少误差累积，保证测图精度，而且还可以分幅测绘，加快测图进度。